

Н. М. Чигринова, Е. И. Воробьева

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА И ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОКРЫТИЙ КАК КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДА АНОДНОГО МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ

Аннотация. Статья посвящена оценке целесообразности и эффективности модернизации процесса микродугового оксидирования (МДО) посредством изменения условий и параметров искрения, а также выбору критериев оценки качества и прогнозирования служебных свойств формируемых керамикоподобных покрытий. Преимущественную роль в изменении характера структурообразования и в обеспечении прогнозируемого качества и свойств оксидируемого сплава играет интенсивность искрения, которое возникает в процессе электрических разрядов, мигрирующих по обрабатываемой поверхности погруженного в электролит объекта. Интенсивность искрения определяет условия получения равнотолщинных покрытий: чем менее стохастичен характер искрения вокруг оксидируемой детали, тем более равномерно и быстро прирастает толщина формируемого покрытия и выше его плотность. Эти соображения позволили предложить вариант модернизации метода анодного МДО (АМДО), отличающегося наличием только анодной составляющей тока, обуславливая тем самым получение тонких покрытий с разветвленной пористостью посредством стабилизации процесса искрения за счет использования системы квазикатодов в электролизной ванне. В настоящем исследовании рассматриваются возможности контроля параметров покрытий, полученных методом АМДО в его стандартном и модернизированном вариантах, посредством фиксации в режиме реального времени характера распределения искровых разрядов, косвенным свидетельством чего является изменение плотности тока во времени и равномерность толщины созданных покрытий. Учитывая влияние характера микродугового оксидирования на структурные и качественные особенности формируемых слоев, было предположено, что поверхность покрытия, полученного модернизированным методом, должна иметь более высокое качество, одним из показателей, которого является более сглаженный и равномерный рельеф. Таким образом, еще одним критерием эффективности модернизированного процесса могут служить амплитудные и шаговые параметры шероховатости, которые, не позволяя провести объективную оценку микропрофиля сформированного покрытия, могут дать более обширную информацию о характере прироста его толщины и изменении качества, определяя в итоге уровень эксплуатационных возможностей металлических объектов с таким покрытием.

Ключевые слова: микродуговое оксидирование, алюминий, квазикатод, искрение, плотность тока, рельеф, шероховатость

Для цитирования: Чигринова, Н. М. Основные параметры процесса и характеристики покрытий как критерии оценки эффективности метода анодного микродугового оксидирования / Н. М. Чигринова, Е. И. Воробьева // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2019. – Т. 64, №4. – С. 419–428. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-4-419-428>

N. M. Chigrinova, E. I. Vorobyova

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

MAIN PROCESS PARAMETERS AND COVERS CHARACTERISTICS AS CRITERIA FOR EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF THE OF ANODIC MICRO-ARC OXIDATION

Abstract. The article is devoted to the evaluation of the feasibility and efficiency of modernization of the microarc oxidation process (MAO) by changing the conditions and parameters of sparking, as well as the selection of criteria for assessing the quality and predicting the service properties of formed ceramic-like coatings. The predominant role in changing the nature of structure formation and in ensuring the predicted quality and properties of the oxidized alloy is played by the intensity of sparking, which occurs in the process of electric discharges migrating along the treated surface of the object immersed in the electrolyte. Intensity of sparking determines the conditions for obtaining equidistant coatings: the less stochastic the nature of sparking around the oxidized part is, the more evenly and rapidly the thickness of the formed coating increases and its density is higher. These considerations allowed us offering the option of upgrading method of the anode MAO (АМАО), wherein only the anodic component of the current, causing thereby obtaining thin coatings with extensive porosity by stabilizing the process of arcing through the use of the system of quasi cathodes in the electrolysis bath. In this study, we consider

the possibility of controlling the parameters of coatings obtained by the AMDO method in its standard and upgraded versions, by fixing in real time the nature of the distribution of spark discharges, indirect evidence of which is the change in the current density over time and the uniformity of the thickness of the coatings created. Taking into account the influence of micro-arc oxidation on the structural and qualitative features of formed layers, it was assumed that the surface of the coating obtained by the modernized method should have a higher quality, one of the indicators of which is a more smooth and uniform relief. Thus, another criterion for the efficiency of the modernized process can serve as amplitude and step parameters of roughness, which, without allowing an objective assessment of the microprofile of the formed coating, can give more extensive information about the nature of the increase in its thickness and quality changes, determining the level of operational capabilities of metal objects with such a coating.

Keywords: micro-arc oxidation, aluminum, quasi-cathode, sparking, current density, relief, roughness

For citation: Chigrinova N. M., Vorobyova E.I. Main process parameters and covers characteristics as criteria for evaluating the effectiveness of the of anodic micro-arc oxidation. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2019, vol. 64, no. 4, pp. 419–428 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-4-419-428>

Введение. Микродуговое оксидирование позволяет получать многофункциональные керамикоподобные покрытия с уникальным комплексом свойств, сочетающих при эксплуатации повышенные износо-, коррозионно- и теплостойкость, электроизоляционные и декоративные особенности. Это определяет востребованность метода во всем мире в таких базовых отраслях промышленности, как авиа-, ракето-, судо-, машино- и приборостроение, медицина, производство текстиля и металлокорда и т. п.

Основным отличием процесса микродугового оксидирования от обычного анодирования и иных методов обработки является использование энергии электрических разрядов, мигрирующих по обрабатываемой поверхности погруженного в электролит объекта, в результате чего формируются керамикоподобные покрытия с регулируемыми в широком диапазоне элементным и фазовым составом, структурой и свойствами.

Микродуговое оксидирование (МДО) является сложным многофакторным процессом формирования керамикоподобных покрытий, эффективность которого, в данном случае скорость прирастания толщины в единицу времени и качество, определяется прежде всего характером и интенсивностью искрения, зависящего в свою очередь от электрических параметров оксидирования – плотности тока, соотношением катодной и анодной его составляющих, напряжением, составом и концентрацией электролита, химическим составом обрабатываемого объекта, количеством и размерами электродов [1–3]. При формировании МДО-слоя возникают проблемы, которые связаны в основном с тем, что на его качество оказывает влияние большое количество различных факторов: состав, концентрация и температура электролита, продолжительность обработки, химический состав и структура материала заготовки, а также электрические режимы процесса МДО. Чем сложнее химический состав анода и больше площади анода и катода, тем более высокая плотность тока должна задаваться при оксидировании. Химическая активность электролита, также ответственная за динамику прироста толщины покрытия в единицу времени, обусловлена его составом, выбор которого продиктован решаемой задачей и требованиями к качеству и свойствам формируемого покрытия.

Анодное микродуговое оксидирование (АМДО), о котором пойдет речь в данном исследовании, отличается от МДО наличием только анодной составляющей тока, что обуславливает сниженную производительность процесса с получением более тонких покрытий, имеющих разветвленную поверхностную пористость. Но при этом энергопотребление ниже на 30–40 %, а наличие на поверхности МДО-покрытий до 75–80 % хрупких, не имеющих прочности и адгезии с металлом муллитных фаз практически исключается в составе АМДО-покрытий. Поэтому в ряде случаев для формирования керамикоподобных покрытий определенного назначения целесообразно предпочесть именно процесс АМДО, используя при этом различные варианты его модернизации.

Постановка проблемы. Условия получения равнотолщинных покрытий прежде всего зависят от распределения тока по поверхности изделия. Чем менее стохастичен характер искрения вокруг оксидируемого объекта, тем более равномерно прирастает толщина формируемого покрытия. Известно, что скорость роста толщины оксидных слоев зависит не только от плотности задаваемого тока, но и от химического состава оксидируемого металла, формы изделия, состава

и состояния электролита [1–3]. Ранее в [4] было проанализировано влияние состава, состояния электролита и химического состава оксидируемого методом АМДО металла на динамику прироста толщины покрытия, что позволило оптимизировать выбор основных факторов АМДО для проведения нового комплекса исследований с использованием системы квазикатодов с целью совершенствования с минимальными энерго- и материальными затратами процесса и создания его новой, перспективной версии за счет стабилизации процесса искрения [5].

Целесообразность такой модернизации определяется возможностью управления распределением микрозарядов по оксидируемой поверхности и, как следствие, более стабильным протеканием процесса АМДО с получением покрытий с улучшенными качественными характеристиками.

В настоящем исследовании рассматриваются возможности контроля параметров покрытий, полученных методом АМДО в его стандартном и модернизированном вариантах, посредством фиксации в режиме реального времени характера распределения искровых разрядов. Свидетельством характера распределения искровых разрядов является изменение плотности тока во времени, толщины созданных покрытий и параметров шероховатости их поверхности.

Методики и оборудование. Процесс АМДО осуществляли на серийных установках МДО-2УВИЕ 440.329.005, содержащих трехфазный источник питания, формирующий импульсы выпрямленного напряжения частотой 150 Гц и амплитудой до 540 В, повышающий трансформатор и силовой блок. Процесс АМДО проводился в электролитической ванне из нержавеющей стали, стенки и дно которой являются катодом.

Для осуществления экспериментов в рамках поставленной цели нами были подготовлены дополнительный катод из нержавеющей стали марки 08Х18Н10 и две группы образцов призматической формы из алюминиевого сплава марки АД33 площадью 0,2 дм². АМДО обеих групп осуществляли в одинаковых условиях: в гальваностатическом режиме при плотности тока 5 А/дм² и амплитудном напряжении 250 В в водном растворе электролита, содержащем 7 г/л Na₂P₄O₇, 2,5 г/л NaOH. При этом первую группу обрабатывали в указанном электролите без применения квазикатодов (далее – образец № 1), а вторую – с установкой дополнительного катода в пространстве электролитической ванны таким образом, чтобы исключить случайный контакт детали с поверхностью катода (далее – образец № 2). Продолжительность оксидирования составляла 5 мин.

Процедура подготовки образцов к проведению процесса АМДО существенно проще, чем для анодирования, химического оксидирования и других процессов, для которых обязательными перед нанесением покрытия являются операции предварительного химического травления, обезжиривания, осветления и промывки. Единственным требованием к подготовке поверхностей обеих групп образцов для проведения последующего изучения качественных характеристик поверхности сформированных покрытий является предварительная подшлифовка их поверхности абразивом SiC на бумажной основе зернистостью Р600 и Р320 для исключения влияния имеющихся неровностей на параметры рельефа в процессе создания покрытия.

С целью определения эффективности предложенной модернизации метода АМДО в процессе экспериментов с двумя подготовленными группами образцов нами контролировались электрические характеристики процесса, толщина и шероховатость получаемых покрытий.

Электрические характеристики фиксировали с помощью цифрового осциллографа В-421. Расчет расхода энергии на образование покрытия толщиной 1 мкм определяли по формулам:

$$P_i = U_i \cdot I_i, \quad (1)$$

где P_i – мощность за измерительный цикл, Вт; U_i – эффективное напряжение за один измерительный цикл, В; I_i – эффективный ток за один измерительный цикл, А;

$$A_i = P_i \cdot t_i, \quad (2)$$

где A_i – энергия (работа) за измерительный цикл, Дж; $t_i = \Delta t / N$ – средняя длительность измерительного цикла, с ($\Delta t = t_2 - t_1$ – длительность процесса, с; t_1 – время начала процесса, с; t_2 – время окончания процесса, с; N – количество измерительных циклов).

Тогда

$$A = \sum_{i=1}^N A_i = \sum_{i=1}^N P_i \cdot \frac{\Delta t}{N}, \quad (3)$$

где A – энергия (работа) за время протекания процесса, Дж; $A_i = A/h$ – энергия (работа), затраченная на рост 1 мкм покрытия, Дж/мкм; h – толщина покрытия, мкм.

Расчет скорости роста покрытия $V_{\text{мкм}}$ осуществляли по выражению

$$V_{\text{мкм}} = \frac{h}{\Delta t}, \text{ мкм/мин.} \quad (4)$$

Расчетный метод проверялся посредством оценки толщины с помощью многофункционального прибора измерения геометрических параметров «Константа К-5» (ТУ 74.06.400.000.00) или прибора аналогичного типа. Методические замеры производили в соответствии с прилагаемой к прибору инструкцией.

Измерения выполняли по всей поверхности сформированных покрытий, предварительно разметив ее с помощью нанесенной карандашом сетки с одинаковым шагом ячеек, с определением средней толщины слоя и отклонений от равнотолщинности. После математической обработки полученных данных строились кривые, отображающие изменение толщины по поверхности покрытия.

Контроль шероховатости осуществляли на приборе Perthometer M2 (Mahr, Германия) с записью параметров шероховатого профиля в заранее выбранном масштабе.

Исследование поверхностей щуповым методом производили в несколько этапов: сначала профиль исследуемого объекта «ощупывали» несколько раз, затем на основании серии измерений вычисляли усредненное значение параметра, характеризующегося как количественное выражение неровности относительно длины участка.

Исследовательская часть. При изучении особенностей оксидирования алюминиевого сплава АД33 типовым методом и с размещением в электролизной ванне дополнительного катода нами было отмечено, что характер, интенсивность и яркость искрения меняются. Оказалось, что самое интенсивное, плотное и яркое искрение, фиксируемое с помощью устройства контроля и управления кинетикой нарастания покрытий (УККП) (патент 5240 Республики Беларусь «Устройство управления микроплазменно-искрым легированием с целью минимизации энергозатрат», авторы – Н. М. Чигринова, В. Е. Чигринов, В. В. Чигринов, А. В. Дроздов), наблюдается при АМДО в электролите с дополнительным катодом. Объяснением этого эффекта являются результаты измерения токовых характеристик процесса, полученные в режиме онлайн с помощью автоматизированного информационно-измерительного комплекса (ИИК) (патент 2601 Республики Беларусь «Способ и устройство контроля и управления кинетикой нарастания покрытий по продолжительности микроплазменно-искрым воздействий», авторы – Н. М. Чигринова, В. Е. Чигринов, А. В. Дроздов).

На осциллограммах изменения в режиме реального времени токовых характеристик при протекании процесса АМДО в стандартном режиме и в электролите с размещенным дополнительным катодом нами было зафиксировано различие в их уровнях: если в стандартном электролите при АМДО средние значения плотности тока соответствуют заданным с помощью оборудования, то в модернизированном варианте при прочих равных задаваемых параметрах оксидирования – плотности тока, времени обработки и одинаковых размерах оксидируемых образцов – отмечаются более высокие, в 1,2–1,6 раза, плотности тока (рис. 1). Известно [4, 5], что при возрастании плотности тока скорость прироста толщины формируемых покрытий увеличивается, но процесс роста становится более неравномерным и менее стабильным, определяя и качество создаваемой поверхности. Поэтому необходимо было установить, не приведет ли интенсификация искрения к ухудшению качества поверхности формируемых оксидных слоев.

В данной работе авторами оценивались основные показатели качества получаемых двумя способами покрытий: прирост толщины, скорость и характер прироста, параметры рельефа созданной поверхности в зависимости от плотности анодного тока, определяющей динамику оксидирования, и наличия или отсутствия дополнительного катода в электролизной ванне.

Измерение толщины полученных изучаемыми способами покрытий показало более интенсивный ее прирост в случае использования в процессе АМДО дополнительного катода (рис. 2). Замеры производились после 5 и 20 мин оксидирования.

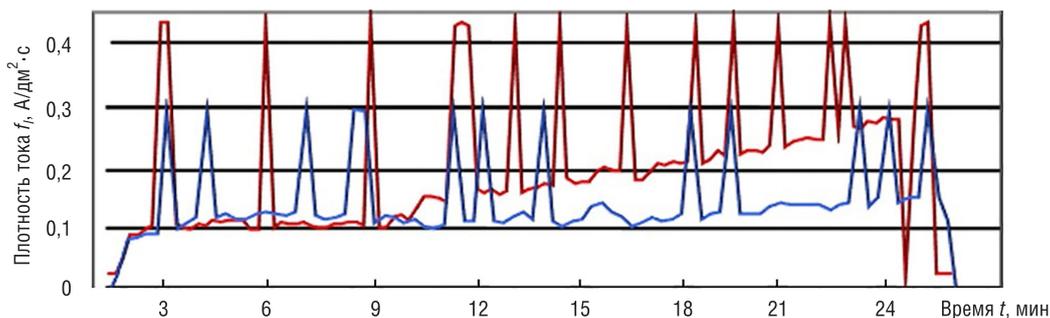


Рис. 1. Изменение плотности тока в режиме реального времени при АМДО в стандартном режиме (нижняя осциллограмма) и с дополнительным катодом (верхняя осциллограмма)
 Fig. 1. Change in current density in real time with AMAO in standard mode (lower oscillogram) and with an additional cathode (upper oscillogram)

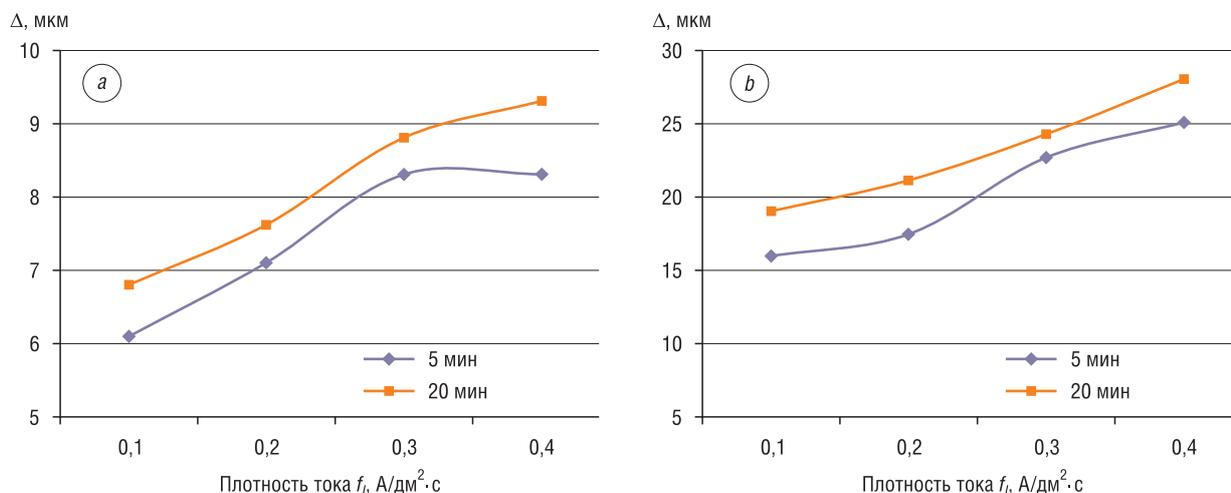


Рис. 2. Прирост толщины покрытия за фиксированное время АМДО при проведении типowego процесса (a) и процесса с дополнительным катодом (b)
 Fig. 2. The increase in coating thickness for a fixed time AMAO during the typical process (a) and process with an additional cathode (b)

Анализ полученных кривых показал, что в обоих случаях увеличение времени АМДО приводит к приросту толщины формируемого покрытия, но характер ее нарастания различен.

Нами установлено, что во всем диапазоне плотностей тока в электролите с дополнительным катодом толщина покрытия при одинаковой продолжительности процесса заметно больше, чем толщина покрытия, полученного типовым методом. При этом характер нарастания толщины слоя более плавный и равномерный.

Кроме того, оказалось, что проведение типowego процесса АМДО в течение 5 мин с возрастанием плотности тока приводит к снижению скорости роста толщины покрытия, что подтверждается выходом кривой прироста на свой максимум, после которого рост толщины покрытия практически прекращается. После 20-минутного оксидирования типовым методом характер кривой, описывающей изменение Δ , также демонстрирует некоторое замедление скорости роста толщины слоя в диапазоне больших плотностей тока.

В электролите с дополнительным катодом кривая толщины покрытия при проведении процесса на больших плотностях тока иллюстрирует монотонный устойчивый подъем независимо от продолжительности АМДО, что свидетельствует о стабилизации процесса искрения и более равномерном ходе оксидирования.

Учитывая влияние характера микродугового оксидирования на структурные и качественные особенности формируемых слоев, авторами настоящего исследования было сделано предположение, что поверхность покрытия, полученного модернизированным методом с дополнительным катодом, должна иметь и более высокое качество.

Одной из определяющих характеристик качества является более сглаженный и равномерный рельеф, показателем чего служат параметры шероховатости. Контролируя шероховатость поверхностей покрытий, сформированных типовым методом и в присутствии квазикаатода, нами принято во внимание то, что различные характеристики параметров определяют многие функциональные свойства поверхности [6, 7]: качество сопряжения (посадки), износостойкость, контактную прочность, светоотражательную способность, теплопередачу, удержание смазки, адгезию и т. д. Сравнительная оценка этих параметров может дать не только представление о процессе массопереноса при анодном микродуговом окислении и об условиях протекания физико-химических взаимодействий в системе металл–электролит, но и позволит прогнозировать рабочие свойства полученной поверхности в различных условиях эксплуатации.

Поэтому при замерах мы использовали все возможности применяемого оборудования с целью фиксации перечисленных показателей шероховатости. Многообразие параметров шероховатости, изложенное в [7], а также в документах ASME B46.1–2002 «Surface Texture, Surface Roughness, Waviness and Lay» и DIN EN ISO 4287:1998 «Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – Terms, definitions and surface texture parameters», отражает особенности контролируемой поверхности, выраженные также и численными показателями. При этом в протоколах измерений указаны условия получения этих численных показателей (таблица).

Так, идентификация неровностей, которые характеризуют оцениваемый профиль, нами проводилась на базовой длине 0,25 мм (отсечка шага). Таким образом, элементы профиля слишком большой длины при оценке поверхности не учитывались.

Базовая длина численно равна длине волны фильтра профиля, который разделяет неровности, относящиеся к шероховатости, от волнистости. Почти все параметры оценивались в пределах базовой длины, но точность измерения повышается, если учитывается их среднее значение на нескольких базовых длинах. Поэтому для оценки профиля мы использовали 5 базовых длин, представляющих собой длину оценки 1,25 мм. Это максимально возможное число базовых длин для используемого прибора.

Профилограммы профиля значительно расширяют представления о контролируемой поверхности (рис. 3).

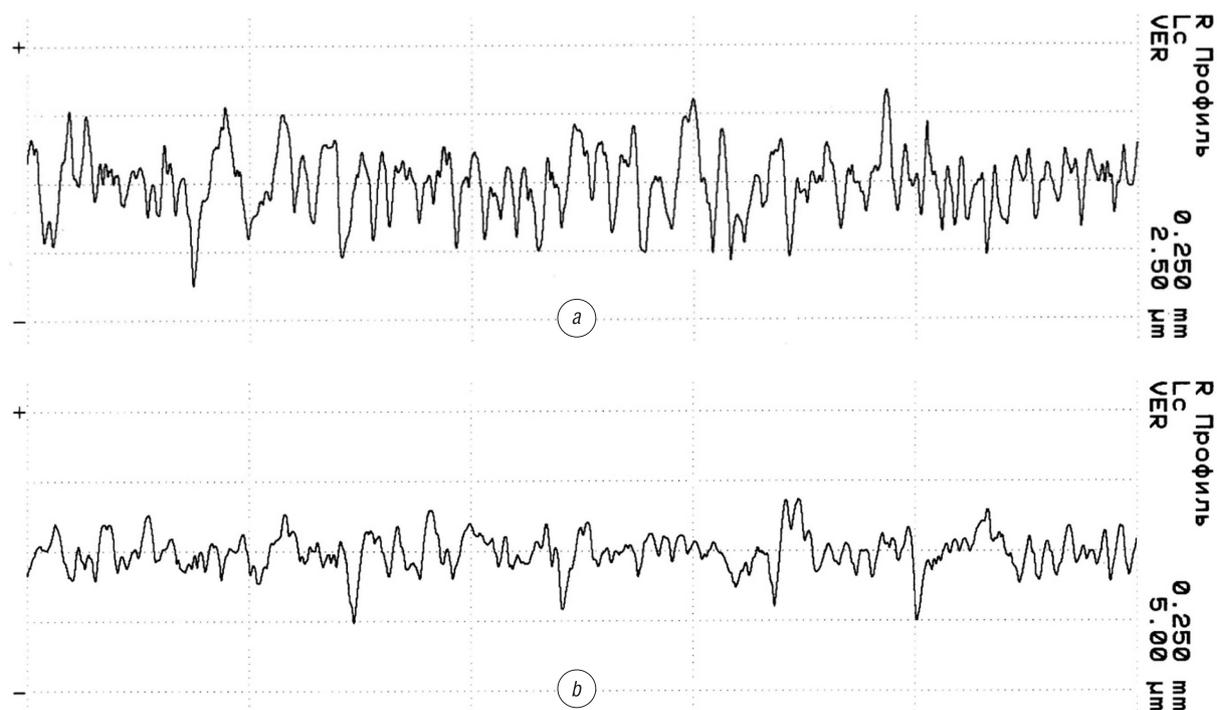


Рис. 3. Профилограммы поверхностей покрытий: *a* – на поверхности образца № 1; *b* – на поверхности образца № 2

Fig. 3. Surface profilograms: *a* – on the sample surface no. 1; *b* – on the sample surface no. 2

**Параметры шероховатости исследуемой поверхности
Parameters of the surface roughness**

Параметр шероховатости исследуемой поверхности	Численный показатель параметра шероховатости исследуемой поверхности	
	Образец № 1	Образец № 2
Базовая длина λ_c , мм	0,250	0,250
Длина трассирования λ_t , мм	1,750	1,750
Отсечка коротких волн λ_s , мкм	2,5	2,5
Среднее арифметическое отклонение профиля Ra , мкм	0,905	0,999
Среднее квадратическое отклонение профиля Rq , мкм	1,151	1,299
Средняя максимальная высота неровности профиля (DIN, ISO) Rz , мкм	5,69	6,99
Средняя максимальная высота элементов профиля (JIS) RzJ , мкм	3,10	3,54
Максимальная высота выступа профиля (DIN, ISO) Rp , мкм	2,81	2,94
Средняя максимальная высота выступа профиля (ASME) Rpm , мкм	2,81	2,94
Высота редуцированных выступов Rpk , мкм	1,25	1,33
Максимальная высота редуцированных выступов $Rpkx$, мкм	2,13	2,05
Высота основы профиля неровностей Rk , мкм	2,6	3,24
Глубина редуцированных впадин Rvk , мкм	1,27	1,79
Максимальная глубина редуцированных впадин $Rvkx$, мкм	2,62	3,68
Наименьший коэффициент материала основы профиля неровностей $Mr1$, %	9,6	9,3
Наибольший коэффициент материала основы профиля неровностей $Mr2$, %	83	91
Полная высота профиля Rt , мкм	7,10	8,86
Базовая глубина профиля шероховатости $R3z$, мкм	3,83	3,67
Плотность выступов Rpc (0,1; -0,1), /см	352	360
Средняя ширина неровностей профиля RSm , мкм	35	47
Средний шаг местных выступов профиля S , мкм	25	23
Средняя глубина повторяющихся элементов шероховатости R , мкм	5,19	5,04
Максимальная глубина неровности профиля Rx , мкм	7,13	9,74
Суммарная ширина повторяющихся элементов шероховатости Ar , мкм	124	103
Коэффициент смятия материала (относительная опорная длина профиля) Rmr , %		
Rmr (1,76; 5,0)	–	0
Rmr (1,41; 5,0)	0	–
Rmr (0; 5,0)	5	5
Rmr (-1,00; 5,0)	19	20
Rmr (-2,00; 5,0)	55	50
Rmr (-3,00; 5,0)	81	79
Rmr (-4,00; 5,0)	96	95
Rmr (-5,00; 5,0)	100	98
Rmr (-6,00; 5,0)	–	99
Rmr (-7,00; 5,0)	–	100
Перепад высот в сечениях профиля $R\delta c$, мкм		
$R\delta c$ (5,0; 15)	0,82	0,75
$R\delta c$ (20, 80)	1,92	2,03
$R\delta c$ (85, 98)	1,20	1,96
Кривая Rmr		
Lc	0,250	0,250
VER	2,5	5,0
HOR	20	20

Для того чтобы исключить влияние ускорения щупа прибора в начале измерения и его замедления в конце, замеры проводились на длине трассирования, которая обычно принимается больше длины оценки и составляет 1,75 мм (рис. 4).

Чтобы отделить шероховатость от более коротких длин волн поверхности (шумов), прибор использует фильтр отсечки коротких волн 2,5 мкм. В случае его отсутствия эффект механического фильтрования создает щуп, который срезает очень короткие волны (2 мкм).

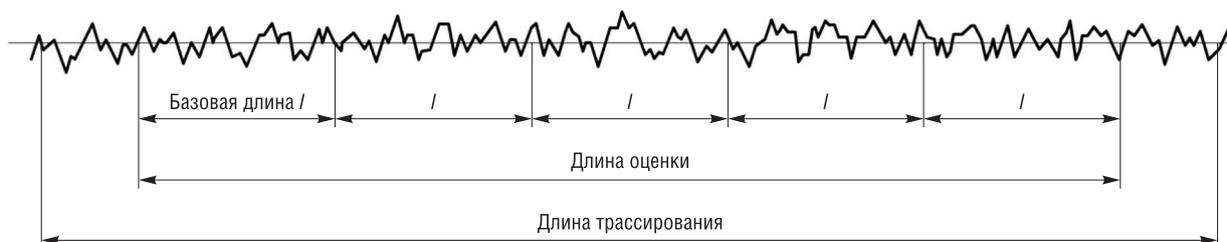


Рис. 4. Базовая длина, длина оценки и длина трассирования

Fig. 4. Sampling length, evaluation length and trace length

Сравнительная оценка этих численных показателей (см. таблицу) для образцов, изготовленных с использованием классической технологии АМДО (образец № 1) и технологии, усовершенствованной дополнительным катодом (образец № 2), позволяет сделать ряд выводов.

Оказалось, что амплитудные параметры профиля поверхности, такие как Ra , Rq , Rz , RzJ , Rp , $R3z$, Rt , являются экстремальными и малоинформативными в обоих случаях. Величина указанных параметров характеризует рельеф поверхности либо по средним элементам поверхности, либо описывается случайными функциями, либо зависит от используемого определения параметра, приводящего к разбросу его значений, что не позволяет сделать вывод об особенностях рельефа исследуемой поверхности и, как следствие, о процессе массопереноса в зависимости от особенностей МДО, определяемых наличием или отсутствием дополнительного катода в электролизной ванне. Но в целом для образцов, изготовленных по модернизированной технологии в заданных условиях, обнаружена закономерность увеличения амплитудных параметров от 10 до 30 %.

Сочетание отдельных амплитудных параметров, таких как Rpm и Rz , полезно для определения неравномерности профиля и, как следствие, опорных или скользящих свойств поверхности. Так, по данным протокола исследования образцы, изготовленные модернизированным дополнительным катодом методом, имеют меньшую асимметричность профиля, что характерно для пористых и керамических поверхностей [3]. Таким образом, можно заключить, что область впадин образца № 2 занимает меньший объем по сравнению с образцом № 1. Это свидетельствует об изменении скорости подвода ионов к поверхности детали – анода, а следовательно, и о перераспределении по поверхности детали микроразрядов, которые возникают только там, где толщина покрытия минимальна. Это означает, что применение дополнительного катода приводит к более равномерному распределению плотности тока по поверхности изделия, гарантируя получение более равномерного по толщине оксидного слоя.

Следствием перераспределения микроразрядов по поверхности детали является их возникновение в области, где поверхность имеет пустоты, таким образом, число характерных элементов профиля (выступов) будет увеличиваться для образца № 2 по сравнению с образцом № 1.

Этот вывод подтверждает шаговой параметр, характеризующий плотность выступов Rps , а также параметры, определяющие средний шаг выступов профиля S , суммарную ширину Ar и среднюю глубину R элементов шероховатости (см. рис. 3). Сочетание этих параметров определяет остроконечность профиля, что в свою очередь влияет на электрическую или термическую проводимость материала и на другие процессы, протекающие в точках непосредственного атомарного взаимодействия контактирующих поверхностей.

Оценивая некоторые амплитудные параметры профиля полученных поверхностей покрытий на изучаемых образцах, среди которых наиболее распространенным является среднее арифметическое отклонение Ra , представляющее собой среднее арифметическое абсолютных значений ординат $Z(x)$ в пределах базовой длины, нами установлено, что для изучаемых образцов этот параметр отличается незначительно: для образца № 1 $Ra = 0,905$ мкм, для образца № 2 – $Ra = 0,999$ мкм, то есть рост шероховатости по этому параметру составил всего 10 %. Можно сделать вывод, что, характеризуя среднюю амплитуду профиля шероховатости, эти единичные нетипичные выступы или впадины незначительно влияют на величину Ra .

Поверхности, имеющие абсолютно разный профиль, могут иметь одинаковые значения Ra . Кроме того, данный параметр малоинформативен для поверхностей, полученных наложением различных технологических процессов [1, 2].

Еще один амплитудный параметр – среднее квадратическое отклонение Rq оцениваемого профиля, является альтернативным параметру Ra , так как и тот, и другой являются усредненной величиной. Однако в связи с тем, что Rq представляет собой среднее квадратическое отклонение распределения высот профиля и может характеризовать профили, описываемые случайными функциями, его применяют для оценки чистых поверхностей, полученных полированием или доводкой. Для рассматриваемого метода обработки этот параметр так же неинформативен, как и Ra , и не может дать представления об эффективности процесса формирования оксидного покрытия на образцах с дополнительными катодами либо без них.

Средняя максимальная высота неровности профиля Rz – амплитудный параметр, который достаточно трудно интерпретировать, имеет не менее пяти различных определений. Авторы [6, 7] определяют его как среднее из максимальных расстояний между выступами и впадинами в каждой из пяти отсечек шага профиля шероховатости. В нормативном документе ASME B46.1–2002 «Surface Texture, Surface Roughness, Waviness and Lay» параметр RzJ определен как сумма средних абсолютных значений высот пяти наибольших выступов и глубин пяти наибольших впадин профиля шероховатости в пределах базовой длины.

Численные значения Rz и RzJ , полученные в ходе настоящего исследования, существенно разнятся. Так, для образца №1 Rz составляет 5,69 мкм, а RzJ – 3,10 мкм. Для образца №2 Rz составляет 6,99 мкм, а RzJ – 3,54 мкм. Таким образом, в зависимости от применяемого определения средняя высота неровностей профиля может колебаться в пределах 50 %. В то же время после обработки образцов модернизированным методом обнаружена закономерность увеличения Rz на 23 % и RzJ – на 14 %.

Заключение. Проведенные исследования позволили оценить эффективность предложенной модернизации метода АМДО за счет использования дополнительного катода в электролизной ванне посредством определения его влияния на изменившиеся при этом условия искрения, нарастание толщины покрытия и изменение параметров его рельефа. Использование дополнительных катодов повышает интенсивность и плотность микроискрения на поверхности детали, приводя к получению более плотного рельефа поверхности с показателями асимметричности, не характерными для хрупких поверхностей, к которым относятся оксидные покрытия.

Таким образом, критериями эффективности процесса могут служить амплитудные и шаговые параметры шероховатости, которые, не позволяя провести объективную оценку микропрофиля сформированного оксидного покрытия, тем не менее могут дать больше информации о характере прироста его толщины и изменении качества, определяя в итоге уровень эксплуатационных возможностей металлических объектов с таким покрытием.

Список использованных источников

1. Технологические возможности микродугового оксидирования алюминиевых сплавов / А. Е. Михеев [и др.] // Вестн. машиностроения. – 2003. – №2. – С. 56–63.
2. Михеев, А. Е. Влияние параметров процесса МДО на формирование покрытий в электролитических растворах / А. Е. Михеев, В. В. Стацура, Н. В. Никушкин // Материалы, технологии, конструкции: сб. науч. тр. – Красноярск, 1995. – С. 144–146.
3. Федоров, В. А. Формирование упрочненных поверхностных слоев методом микродугового оксидирования в различных электролитах и при изменении токовых режимов / В. А. Федоров, В. В. Белозеров, Н. Д. Великосельская // Физика и химия обработки материалов. – 1991. – №1. – С. 87–93.
4. Чигринова, Н. М. Интенсификация процессов микроплазменного упрочнения и восстановления металлических изделий повышенной точности электромеханическим воздействием: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.07 / Н. М. Чигринова. – Минск, 2009. – 371 л.
5. Чигринова, Н. М. Влияние квазикатодов на формирование равнотолщинных слоев при микродуговом оксидировании вентильных металлов / Н. М. Чигринова, Е. И. Воробьева // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 16-й Международ. науч.-техн. конф., Минск, 25–27 янв. 2018 г. – Минск, 2018. – С. 346–349.
6. Табенкин, А. Н. Шероховатость, волнистость, профиль. Международный опыт / А. Н. Табенкин, С. Б. Тарасов, С. Н. Степанов; под ред. Н. А. Табачниковой. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. – 136 с.
7. Dagnall, H. M. A. Exploring surface texture / H. M. A. Dagnall. – Leicester, England: Rank Taylor Hobson, 1980. – 170 p.

References

1. Mikheev A. E., Terekhin N. A., Statsura V. V., Golenkova A. A. Technological capabilities of microarc oxidation of aluminum alloys. *Vestnik mashinostroeniya* [Engineering Bulletin], 2003, no. 2, pp. 56–63 (in Russian).
2. Mikheev A. Ye., Statsura V. V., Nikushkin N. V. Influence of the MAO process parameters on the formation of coatings in electrolytic solutions. *Materialy, tekhnologii, konstruktii: sbornik nauchnykh trudov* [Materials, Technologies, Designs: Collection of Scientific Papers]. Krasnoyarsk, 1995, pp. 144–146 (in Russian).
3. Fedorov V. A., Belozеров V. V., Velikoselskaya N. D. The formation of hardened surface layers by the method of micro-arc oxidation in various electrolytes and when current conditions change. *Fizika i khimiya obrabotki materialov = Physics and Chemistry of Materials Treatment*, 1991, no. 1, pp. 87–93 (in Russian).
4. Chigrinova N. M. *Intensification of Processes of Microplasma Spark Hardening and Restoration of Metal Products of High Accuracy by Electromechanical Impact*. Minsk, 2010. 310 sheets (in Russian).
5. Chigrinova N. M., Vorob'eva E. I. The effect of quasicathodes on the formation of equal-thickness layers during micro-arc oxidation of valve metals. *Nauka – obrazovaniyu, proizvodstvu, ekonomike: materialy 16-i Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, Minsk, 25 yanvarya 2018 g.* [Science – Education, Production, Economics: Proceedings of the 16th International Scientific and Technical Conference, Minsk, January 25–27, 2018]. Minsk, Belarusian National Technical University, 2018, pp. 346–349 (in Russian).
6. Tabenkin A. N., Tarasov S. B., Stepanov S. N., Tabachnikova N. A. (ed.). *Roughness, Waviness, Profile. International Experience*. St. Petersburg, Polytechnic University Publ., 2007. 136 p. (in Russian).
7. Dagnall H. M. A. *Exploring Surface Texture*. Leicester, England, Rank Taylor Hobson, 1980. 170 p.

Информация об авторах

Чигринова Наталья Михайловна – доктор технических наук, профессор, доцент кафедры «Торговое и рекламное оборудование», Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 67, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: chygrynova@yandex.by

Воробьева Елена Игоревна – аспирант, преподаватель кафедры «Торговое и рекламное оборудование», Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 67, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: alena.vorobeo@yandex.by

Information about the authors

Natalia M. Chigrinova – D. Sc. (Engineering), Professor, Associate Professor of the Department “Trade and Advertising Equipment”, Belarusian National Technical University (67, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: chygrynova@yandex.by

Elena I. Vorobyova – Postgraduate, Lecturer of the Department “Trading and advertising equipment”, Belarusian National Technical University (67, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: alena.vorobeo@yandex.by